磷酸一二钙对肉仔鸡相对生物学利用率的研究

万敏艳　张保海　王宏博　唐德富*

（甘肃农业大学动物科学技术学院，兰州 730070）

摘　要：本试验旨在研究磷酸一二钙（MDCP）和磷酸氢钙（DCP）对肉仔鸡生长性能、胫骨指标和血清生化指标的影响，以评价 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率。试验采用 2×6 双因子随机区组试验设计，采用 MDCP 和 DCP 2 种磷源，设 6 个磷添加水平（0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%和 0.25%），将 990 只 1 日龄健康科宝肉公鸡按体重相近原则随机分为 11 个组（对照组共用），每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。试验期 21 d。结果表明，磷源和磷添加水平交互作用对肉仔鸡生长性能、养分表观代谢率、胫骨指标和血清生化指标均无显著影响（$P>0.05$）。MDCP 添加组肉仔鸡采食量、体增重、胫骨灰分含量、血清磷含量均显著高于 DCP 添加组（$P<0.05$），而血清碱性磷酸酶活性显著低于 DCP 组（$P<0.05$），且随着磷添加水平提高，肉仔鸡采食量、体增重显著增加（$P<0.05$），而料重比和死淘率显著降低（$P<0.05$）。0.25%添加组的钙表观代谢率显著高于对照组和 0.05%添加组（$P<0.05$），且其磷表观代谢率、胫骨钙含量、胫骨磷含量和胫骨强度显著高于对照组（$P<0.05$）。随着磷添加水平的提高，血清磷含量显著提高（$P<0.05$），而血清碱性磷酸酶活性显著降低（$P<0.05$）。综合考虑肉仔鸡体增重、胫骨指标和血清生化指标，相对于 DCP（100%），MDCP 对肉仔鸡的生物学利用率是 112.5%。

关键词：肉仔鸡；磷酸一二钙；磷酸氢钙；生物学利用率

中图分类号：S831　　　　文献标识码：　　　　文章编号：

收稿日期：2018-02-12
基金项目：国家自然科学基金（31660664，31702131）；云天化国际植物营养研究院开放项目（YTHZWYJY2016004）；甘肃农业大学“伏羲青年英才培养计划”（Gaufx-02Y07）
作者简介：万敏艳（1992-），女，陕西咸阳人，硕士研究生，研究方向为家禽营养。E-mail: 1251639348@qq.com
*通信作者：唐德富，副教授，硕士生导师，E-mail: tangdf@gsau.edu.cn

磷作为家禽营养的常量矿物质元素，是构成骨组织的主要原料。鸡体所含磷的80%存在于骨骼中，骨灰分中磷含量高达70%以上[1]。鸡在育成期骨骼生长迅速，需要从饲粮中摄取足量的磷以保证健康。磷参与机体内能量与多种营养物质的代谢过程，同时组成血液中的磷酸盐缓冲体系，在保持血液酸碱平衡方面起重要作用。肉仔鸡饲粮中钙、磷缺乏，或者比例失调，均可导致佝偻病，出现长骨弯曲变形、骨钙化程度降低、腿部软弱、生长发育受阻、饲料利用率低、死亡率升高等现象[2]。饲粮中磷的来源比较广泛，如磷酸氢钙（DCP）（无水、2个结晶水）、磷酸二氢钙（MCP）、磷酸钙等，其中以DCP的使用量最大，我国每年DCP的用量接近400万t，全球超过1 000万t，由于DCP枸溶性磷的含量相对较高，致使磷的利用率偏低[3-4]。磷酸一二钙（MDCP）是MCP与DCP的共晶结合物，与DCP相比，MDCP水溶性磷的含量高达17.5%，远高于国标10%的标准[5]。早期研究证实，动物饲粮中使用高水溶性磷源，随粪尿排放到环境中的磷酸盐更易于植物吸收利用[6]。目前，MDCP作为一种有别于MCP和DCP的新型磷源产品，市场占有率稳步提高，然而现有资料关于其在肉仔鸡饲粮中的生物学利用率评定的报道相对较少也较早，因此十分有必要重新评定其生物学利用率。本试验通过饲养试验、代谢试验对生长性能、胫骨指标和血清生化指标进行测定，旨在评价MDCP相对于DCP的生物学利用率，为MDCP在肉鸡饲粮中的应用提供参考数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

高水溶性MDCP，饲料级，钙、无机磷含量分别为14.7%和21.4%；DCP纯度为99%，钙、无机磷含量分别为23.0%和17.7%。

1.2 试验设计

采用2×6双因子随机区组设计，MDCP和DCP 2种磷源，磷的添加水平分别为0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%和0.25%，基础饲粮非植酸磷水平为0.15%。选择990只1日龄健康

科宝肉公鸡，按各组间平均体重相近原则随机分为 11 个组（对照组共用），每组 6 个重复，每个重复 15 只鸡。试验期 21 d。

1.3　试验饲粮

试验饲粮为玉米–豆粕–杂粕型，参考中华人民共和国农业行业标准《鸡饲养标准》（NY/T 33-2004）[7]营养推荐量（有效磷除外）设计配方，饲料原料中粗蛋白质、钙、磷的含量为实测值，其他指标参考中国饲料数据库 2015 年《中国饲料成分及营养价值表》（第 26 版）。试验饲粮为粉料，所有饲粮均添加 0.40%二氧化钛作为外源性指示剂。试验饲粮组成及营养水平见表 1。

1.4　饲养管理

试验鸡舍为全封闭式，3 层重叠式笼养，单笼面积为 0.93 m^2。各组间重复的排列考虑位置效应。1~3 日龄保持舍内温度 33～36 ℃，然后每日降低 1 ℃，直至 14 日龄末降至 24 ℃并保持到试验结束。1~3 日龄鸡舍相对湿度为 70%～75%，之后保持在 50%～65%。机械通风，人工光照，23 h 连续光照后黑暗 1 h，自由饮水，自由采食。鸡舍及时清粪与清扫、消毒，每周带鸡消毒 2 次。免疫程序及方法参考商业公司推荐的方案执行。

1.5　样品采集与制备

在饲养试验的 17～20 日龄进行消化代谢试验，不另设预试期。在各重复试验鸡粪盘上铺塑料台布，每天下午定时收集全部新鲜粪样（挑出里面的羽毛、饲料、皮屑等杂物），混合后取 20%放于自封袋内，喷洒 10%盐酸溶液后 4 ℃冰箱保存，最后将 4 d 收集的粪样按重复进行充分混合，于 65 ℃烘箱中烘干至恒重，再置室温下回潮 24 h，粉碎过 40 目筛，待测。

于试验期的第 21 天末从每组每个重复取 2 只鸡，翅静脉采血 5 mL，立即将血液 3 000 r/min 离心 10 min，取上清液于-20 ℃保存，待测血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性。采血后的鸡通过颈部移位处死，取鸡的左腿胫骨，去除肌肉和结缔组织，于 105 ℃烘干 48 h，

以备分析胫骨的抗压能力。然后脱脂 8 h，再于 580 ℃茂福炉中煅烧 24 h，用于分析胫骨中的灰分、钙和磷的含量。

1.6 测定指标和方法

1.6.1 生长性能

于第 21 日龄末以重复为单位进行称重，记录耗料量，计算采食量、体增重、死淘率及料重比。

1.6.2 养分表观代谢率

试验饲粮和代谢排泄物均测定钙、磷和二氧化钛含量，并测定饲粮系酸力，计算干物质、钙和磷表观代谢率。其中钙和磷含量的测定参考张丽英[8]方法；按照 Short 等[9]描述的方法进行二氧化钛含量的测定；系酸力参考屠焰等[10]推荐的方法测定。

1.6.3 胫骨指标和血清生化指标

胫骨灰分含量的测定参照 GB 6438—1986 方法进行。胫骨的抗压能力采用抗压强度测定仪（ZN7-16A 型）测定。血清中的钙、磷含量和碱性磷酸酶活性使用试剂盒测定，试剂盒购自南京建成生物工程研究所。

1.7 数据统计

采用 SAS 9.2 软件中 GLM 程序对所有试验数据进行双因子方差分析，统计模型中包括磷源、磷水平和二者间的互作。方差分析差异显著者，以 LSD 法比较平均值间的差异显著性；用 SAS 程序中的 GLM 程序中最小二乘法多元线性回归方程：

$Y=b0+b1X(\mathrm{s})+b2X(\mathrm{t})$。

式中：Y 为所测指标；$X(\mathrm{s})$、$X(\mathrm{t})$分别为 DCP 和 MDCP；$b0$、$b1$、$b2$ 为方程系数。以 DCP 为标准（100%），用多元线性回归斜率比法计算 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率[11]。

表 1　试验饲粮组成及营养水平(风干基础)

Table 1　Composition and nutrient levels of experimental groups （air-dry basis） %

项目 Items	对照组 Control group	磷添加水平 P supplemented level/%									
		磷酸氢钙 DCP					磷酸一二钙 MDCP				
		0.05	0. 10	0. 15	0. 20	0. 25	0. 05	0. 10	0. 15	0. 20	0. 25
玉米 Corn	61.14	61.09	61.00	60.59	60.54	60.34	61.00	60.81	60.56	60.29	60.19
豆粕 Soybean meal	21.90	21.90	21.89	22.10	22.00	22.00	21.89	22.00	22.00	22.00	22.00
菜籽油 Rapeseed oil	2.00	2.00	2.00	2.05	2.10	2.20	2.00	2.00	2.10	2.20	2.20
棉籽粕 Cottonseed meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
玉米蛋白粉 Corn gluten meal	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
菜籽粕 Rapeseed meal	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00	4.00
石粉 Limestone	2.40	2.20	2.00	1.85	1.65	1.50	2.30	2.15	2.10	2.00	1.90
磷酸一二钙 MDCP							0.25	0.48	0.68	0.95	1.15

磷酸氢钙 DCP		0.25	0.55	0.85	1.15	1.40					0
预混料 Premix[1)]	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
食盐 NaCl	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
DL-蛋氨酸 *DL*-Met	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
L-赖氨酸 *L*-Lys	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62
小苏打 Sodium bicarbonate	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
氯化胆碱 Choline chloride	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
二氧化钛 $Ti0_2$	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40	0.40
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels[2)]											
代谢能 ME/（kJ/kg）	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30	12 348.30
粗蛋白质 CP	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00	20.00
钙 Ca	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

非植酸磷 NPP	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40
总磷 TP	0.43	0.49	0.53	0.55	0.62	0.70	0.46	0.50	0.53	0.60	0.67
蛋氨酸 Lys	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50
赖氨酸 Met	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
蛋氨酸＋半胱氨酸 Met+Lys	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86	0.86
系酸力 Acid-binding capacity/mL	15.21	14.63	15.08	13.96	14.24	13.54	13.28	14.21	13.37	14.02	13.65

[1)]预混料为每千克饲粮提供 Premix provided the following per kg of diets：VA 11 000 IU，VD_3 3 025 IU，VE 22 mg，VK_3 2.2mg，VB_1 1.65 mg，VB_2 6.6 mg，VB_6 3.3 mg，VB_{12} 17.6 μg；烟酸 niacinamide 22 mg，泛酸 pantothenate 13.2 mg，叶酸 folic acid 0.33 mg，生物素 biotin 88 μg，Fe 48 mg，Zn 96.6 mg，Mn 101.76 mg，Cu 10 mg，Se 0.05 mg，I 0.96 mg。

[2)]总磷、系酸力为实测值，其他营养水平为计算值。TP and acid-binding capacity were measured values, while the other nutrient levels were calculated values.

2 结　果

2.1　不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡生长性能的影响

不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡生长性能影响的结果见表 2。由表可知，MDCP 添加组肉仔鸡采食量和体增重均显著高于 DCP 添加组（P<0.05），随着磷添加水平提高，肉仔鸡采食量、体增重均显著增加（P<0.05），而料重比和死淘率显著降低（P<0.05）。磷源和磷添加水平互作对肉仔鸡生长性能各指标均无显著影响（P>0.05）。

表 2　不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡生长性能的影响

Table 2　Effects of different phosphorus sources and levels on growth performance of broilers

项目 Items	磷添加水平 P supplemental level/%	采食量 Feed intake/g	体增重 Body weight gain/g	料重比 Feed/gain	死淘率 Mortality/%
磷酸氢钙 DCP	0	412.3	227.2	1.77	71.1
	0.05	463.2	279.3	1.73	50.0
	0.10	570.5	345.3	1.68	18.8
	0.15	689.4	428.5	1.62	5.6
	0.20	765.6	503.4	1.52	1.1
	0.25	909.2	587.6	1.53	2.2
磷酸一二钙 MDCP	0	412.3	227.7	1.77	71.7
	0.05	554.2	332.7	1.70	44.4
	0.10	692.5	441.1	1.60	10.0
	0.15	833.0	534.3	1.56	2.2
	0.20	899.8	608.6	1.48	3.3
	0.25	965.4	678.4	1.46	3.3

SEM		21.1	12.3	0.01	7.5
主效应 Main effect					
磷源 P source	磷酸氢钙 DCP	634.7^{b}	394.8^{b}	1.64	24.8
	磷酸一二钙 MDCP	726.0^{a}	470.0^{a}	1.60	22.5
磷添加水平 P supplemental level/%	0	412.0^{f}	227.0^{f}	1.77^{a}	71.4^{a}
	0.05	508.5^{e}	305.5^{e}	1.72^{a}	47.2^{b}
	0.10	631.0^{d}	393.1^{d}	1.64^{b}	14.4^{c}
	0.15	761.1^{c}	481.2^{c}	1.59^{b}	3.9^{d}
	0.20	832.4^{b}	555.5^{b}	1.50^{c}	2.2^{d}
	0.25	937.3^{a}	632.5^{a}	1.50^{c}	2.75^{d}
P 值 *P*-value	磷源 P source	0.002	0.001	0.241	0.885
	磷添加水平 P supplemental level	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001
	磷源×磷添加水平 P source×P supplemental level	0.184	0.114	0.098	0.297

同列数据肩标不同小写字母表示差异显著（P<0.05），相同或无字母表示差异不显著（P>0.05）。下表同。

In the same column, values with different small letter superscripts mean significant difference (P<0.05), while with the same or no letter superscripts mean no significant difference (P>0.05). The same as below.

2.2 不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡养分表观代谢率的影响

不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡养分表观代谢率影响的结果见表 3。由表可见，磷源对肉仔鸡钙、磷表观代谢率无显著影响（P>0.05）。0.25%添加组的钙表观代谢率显著高于对照组和 0.05%添加组（P<0.05），且磷表观代谢率显著高于对照组和 0.05%、0.10%添加组（P<0.05）。

表 3　不同磷源和磷水平对肉仔鸡养分表观代谢率的影响

Table 3　Effects of different phosphorus sources and levels on nutrient apparent metabolic rate of broilers　%

项目 Items	磷添加水平 P supplemental level/%	干物质 DM	钙 Ca	磷 P
磷酸氢钙 DCP	0	71.3	34.2	40.6
	0.05	72.9	33.8	44.8
	0.10	70.0	37.4	46.9
	0.15	70.7	39.6	48.5
	0.20	71.9	40.8	52.4
	0.25	71.5	40.5	53.7
磷酸一二钙 MDCP	0	71.3	34.2	40.6
	0.05	71.1	35.3	45.7
	0.10	71.3	36.2	47.9
	0.15	71.2	35.9	51.2
	0.20	71.5	40.5	54.6
	0.25	71.3	41.7	57.9
SEM		1.8	1.1	1.6
主效应 Main effect				

磷源 P source	磷酸氢钙 DCP	71.9	37.7	47.8
	磷酸一二钙 MDCP	70.7	37.3	49.7
磷添加水平 P supplemental level/%	0	71.3	34.2[b]	40.6[c]
	0.05	71.9	34.6[b]	45.3[bc]
	0.10	70.6	36.8[ab]	47.4[b]
	0.15	71.0	37.8[ab]	49.9[ab]
	0.20	71.2	40.7[ab]	53.5[ab]
	0.25	71.4	41.1[a]	55.8[a]
P 值 *P*-value	磷源 P source	0.289	0.895	0.786
	磷添加水平 P supplemental level	0.341	0.038	0.008
	磷源×磷添加水平 P source×P supplemental level	0.279	0.792	0.478

2.3　不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡胫骨指标的影响

不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡胫骨指标影响的结果见表 4。由表可见，MDCP 添加组肉仔鸡胫骨灰分含量显著高于 DCP 组（P<0.05）。随着磷添加水平的提高，肉仔鸡胫骨灰分、钙、磷含量和胫骨强度均有所改善，0.25%添加组胫骨灰分含量和胫骨强度显著高于对照组和 0.05%、0.10%添加组（P<0.05），且胫骨磷含量显著高于对照组（P<0.05）；0.20%和 0.25%添加组胫骨钙含量显著高于对照组和 0.05%添加组（P<0.05）；对照组和 0.05%添加组胫骨灰分含量显著低于 0.15%和 0.20%添加组（P<0.05）；0.20%添加组胫骨强度显著高于对照组和 0.05%、0.10%添加组（P<0.05）。

表 4　不同磷源和磷水平对肉仔鸡胫骨指标的影响

Table 4　Effects of different phosphorus sources and levels on tibia indices of broilers

项目 Items	磷添加水平 P supplemental level/%	胫骨灰分含量 Tibia ash content/%	胫骨钙含量 Tibia Ca content/%	胫骨磷含量 Tibia P content/%	胫骨强度 Tibia strength/g
磷酸氢钙 DCP	0	28.24	13.32	5.26	4 054.2
	0.05	29.12	14.14	5.73	5 126.3
	0.10	33.28	15.35	6.24	7 024.1
	0.15	37.73	16.27	6.98	11 002.4
	0.20	42.63	18.39	7.36	16 395.6
	0.25	46.21	19.15	8.38	17 523.3
磷酸一二钙 MDCP	0	28.24	13.32	5.26	4 054.2
	0.05	30.15	14.89	6.13	7 853.1
	0.10	34.21	16.02	6.58	9 415.6
	0.15	39.79	18.29	7.42	12 152.6
	0.20	45.28	20.14	8.02	17 091.3
	0.25	47.18	21.22	8.97	17 795.6
SEM		2.14	0.98	0.24	235.2
磷源 P source	磷酸氢钙 DCP	36.20^{b}	16.10	6.69	10 187.65
	磷酸一二钙 MDCP	37.48^{a}	17.31	7.06	11 393.73
磷添加水平 P supplemental level/%	0	28.24^{c}	13.32^{b}	5.26^{b}	4 054.20^{d}
	0.05	29.64^{c}	14.52^{b}	5.93^{ab}	6 489.70^{c}
	0.10	33.75^{bc}	15.69^{ab}	6.41^{ab}	8 219.85^{bc}
	0.15	38.76^{b}	17.28^{ab}	7.20^{ab}	11 577.50^{ab}

	0.20	43.96^{ab}	19.27^{a}	7.69^{ab}	16 743.45^{a}
	0.25	46.70^{a}	20.19^{a}	8.68^{a}	17 659.45^{a}
P 值 *P*-value	磷源 P source	0.041	0.247	0.343	0.072
	磷添加水平 P supplemental level	0.002	0.024	0.038	0.007
	磷源×磷添加水平 P source×P supplemental level	0.214	0.745	0.562	0.495

2.4　不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响

不同磷源和磷添加水平对肉仔鸡血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性影响的结果见表 5。由表可见，MDCP 添加组肉仔鸡血清磷含量和碱性磷酸酶活性显著高于 DCP 添加组（$P<0.05$）。随着磷添加水平的提高，肉仔鸡血清磷含量显著提高（$P<0.05$），而血清碱性磷酸酶活性显著降低（$P<0.05$）。

表 5　不同磷源和磷水平对肉仔鸡血清钙、磷含量和碱性磷酸酶活性的影响

Table 5　Effects of different phosphorus sources and levels on serum calcium, phosphorus contents and alkaline phosphatase activity of broilers

项目 Items	磷添加水平 P supplemental level/%	钙 Ca/（mmol/L）	磷 P/（mmol/L）	碱性磷酸酶 ALP/(U/dL)
磷酸氢钙 DCP	0	2.07	1.84	1 083.1
	0.05	2.03	1.93	974.8
	0.10	2.02	2.23	843.6
	0.15	1.98	2.34	746.7
	0.20	1.99	2.59	656.5

	0.25	2.08	2.93	603.9
	0	2.07	1.84	1 083.1
	0.05	2.09	2.05	956.4
磷酸一二钙	0.10	2.05	2.30	819.9
MDCP	0.15	2.06	2.43	724.4
	0.20	2.03	2.67	615.9
	0.25	2.09	3.15	572.2
SEM		0.01	0.05	21.4
磷源 P source	磷酸氢钙 DCP	2.03	2.31[b]	818.1[a]
	磷酸一二钙 MDCP	2.06	2.41[a]	795.3[b]
磷添加水平 P supplemental level/%	0	2.07	1.84[d]	1 083.1[a]
	0.05	2.06	1.98[d]	965.6[a]
	0.10	2.04	2.26[c]	831.7[b]
	0.15	2.03	2.38[c]	735.6[c]
	0.20	2.02	2.64[b]	636.2[d]
	0.25	2.09	3.05[a]	588.2[e]
P 值 *P*-value	磷源 P source	0.735	<0.001	0.012
	磷添加水平 P supplemental level	0.524	<0.001	0.040
	磷源×磷添加水平 P source×P supplemental level	0.632	0.524	0.830

2.5 MDCP 的相对生物学利用率

MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率见表 6。由表可知，以 1～21 日龄肉仔鸡体增重、

钙表观代谢率、磷表观代谢率、胫骨灰分、胫骨钙含量、胫骨磷含量、胫骨强度、血清磷含量和血清碱性磷酸酶活性为效应指标，MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率分别为 124.7%、96.7%、131.2%、106.7%、108.7%、118.1%、105.3%、114.5%和 106.4%。经检验，上述效应指标多元线性回归方程系数均显著（$P<0.05$），表明均适合判定生物学效价，即所得生物学利用率的平均值（112.5%）为 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率。

表 6　MDCP 的相对生物学利用率

Table 6　Relative bioavailability of MDCP

所选效应指标 Selected effect index	多元线性回归方程 Multiple linear regression equation	MDCP 的相对生物学利用率 Relative bioavailability of MDCP/%	P 值 P-value	R^2
体增重 Body weight gain	Y=227.74+1458.0X(s)+1817.6X(t)	124.7	<0.001	0.89
钙表观代谢率 Ca apparent metabolic rate	Y=33.67+31.18X(s)+30.15X(t)	96.7	0.039	0.81
磷表观代谢率 P apparent metabolic rate	Y=41.50+50.92X(s)+66.83X(t)	131.2	0.017	0.89
胫骨灰分含量 Tibia ash content	Y=27.32+77.04X(s)+82.24X(t)	106.7	<0.001	0.91
胫骨钙含量 Tibia Ca content	Y=13.13+27.46X(s)+29.84X(t)	108.7	<0.001	0.92
胫骨磷含量 Tibia P content	Y=5.21+12.13X(s)+14.32X(t)	118.1	<0.001	0.89

胫骨强度 Tibial strength	Y=3 494.61+60 137.2X(s)+63 321.8X(t)	105.3	0.042	0.79
血清磷含量 Serum P content	Y=1.78+4.31X(s)+4.92X(t)	114.5	0.003	0.92
血清碱性磷酸酶活性 Serum ALP activity	Y=1 061.1-1970.2X(s)-2 098.3X(t)	106.4	<0.001	0.94
MDCP 的相对生物学利用率 Relative bioavailability of MDCP	112.5%			

3 讨 论

3.1 不同磷源和磷水平对肉仔鸡生长性能的影响

全球磷资源有限，且磷是不可再生资源[12]。据统计，美国有 33%的磷通过畜禽粪便排放到土壤中，造成了严重的环境污染[13]。因此，降低畜禽排泄物中磷的排放刻不容缓。目前，对动物而言，降低磷的排放量主要有 2 种策略：一是通过添加外源性植酸酶，提高饲粮中植酸磷的利用，进而降低无机磷的添加量以达到磷减排目的[14-15]；二是选择使用生物学效价更高的磷源或通过营养调控技术改善磷的有效利用率以及动物生长速度来实现磷减排[16]。前者因饲粮中植酸磷的含量有限，在不影响畜禽生长性能的前提下添加植酸酶饲粮有效磷可降低至 0.20%~0.25%，而寻求高效价的磷源才能最大幅度降低粪污中磷的排放。当前饲料工业使用最多的磷源为 DCP，DCP 属于枸溶性磷酸盐，难溶于水，溶与盐酸或柠檬酸，动物对其利用率低。MDCP 是 DCP 和 MCP 的共晶结合物，是一种水溶性磷酸盐和枸溶性磷酸盐相结合的饲料添加剂，其中 MCP 是水溶性磷酸盐，约占 60%。早期研究结果表明，MDCP 作为磷源比 DCP 更具优势。伍爱民等[17]研究表明，与 DCP 相比，MDCP 改善了肉鸡的体重和

体增重。类似的结果万荣等[18]、夏良宙等[19]均有报道。此外，陈晓春等[20]在蛋鸡上的研究显示，以磷酸二氢钾（MPP）为标准，磷源的相对生物学效价从大到小依次为：MDCP、DCP、MCP、MPP，表明 MDCP 较 DCP 是家禽饲粮更好的磷源。本试验也观测到 MDCP 添加组肉仔鸡在 1～21 日龄体增重和采食量均显著高于 DCP 添加组，再次证实了 MDCP 的应用价值。

磷缺乏易造成畜禽出现骨生长缓慢，佝偻病和骨软症[2]。我国国标中规定肉用仔鸡饲粮 1～2 周龄和 3～6 周龄总磷和非植酸磷含量分别为 0.68%、0.50%和 0.65%、0.40%[7]。早期关于饲粮磷水平对肉仔鸡生长性能影响的报道较多。Liu 等[21]在爱拔益加肉仔鸡玉米-豆粕型饲粮中分别设置 0.10%、0.15%、0.25%、0.30%、0.35%、0.40%、0.45%和 0.50%共 8 个非植酸磷水平（磷源 $CaHPO_4{\cdot}2H_2O$，基础饲粮非植酸磷和钙含量分别为 0.08%和 1.00%），研究饲粮非植酸磷需要量，结果发现磷水平显著影响肉仔鸡体增重，呈显著线性增加趋势，建议 1～21 日龄饲粮适宜非植酸磷含量为 0.39%。这与本试验结果基本一致。以 21 日龄体增重等为效应指标，本试验得到 MDCP 相对于 DCP 的生物学利用率为 112.5%，接近于伍爱民等[17]报道的 113.2%，再次证实了 MDCP 作为家禽饲粮磷源的优势。

3.2　不同磷源和磷水平对肉仔鸡胫骨指标的影响

钙和磷是构成骨骼及牙齿的主要原料，正常的骨中储有大量磷和钙，占鸡体内矿物质总重量的 65%～70%[22]。骨组织也同其他器官组织一样不断进行着新陈代谢，起着调节血液中钙、磷含量的作用，当饲粮中钙和磷不能满足机体需要时，则必须从骨骼中动用，在一定限度内，贮存钙、磷的消耗并不危及生命[23]，但临床胫骨症状较明显，胫骨质量是衡量机体钙、磷水平和平衡程度的重要靶标。王晋晋等[24]研究表明，饲粮中钙、磷水平对肉仔鸡的胫骨灰分以及胫骨中钙、磷的沉积有显著影响，提高饲粮钙、磷水平可增加胫骨灰分含量，非植酸磷水平增加能够显著提高胫骨强度，这与 Liu 等[21]、Wilkinson 等[25]、Bradbury 等[26]以及本试验结果相一致。分析认为这可能是由于低钙、磷水平的饲粮导致钙、磷未得到满足，或是

由于钙、磷比例严重失调,在动物消化道中形成不可溶、难以被吸收利用的钙磷复合物,从而减少了骨骼中灰分的沉积。同时,骨骼在前 3 周生长速度较快,对钙、磷的需要量较大,而饲粮中的磷又不能满足肉鸡生长发育的需要,因此必须动用骨骼中沉积的磷以弥补饲粮磷不足,骨矿化程度下降,最终造成骨强度降低[27]。

3.3 不同磷源和磷水平对肉仔鸡血清生化指标的影响

碱性磷酸酶是一类非特异性磷酸单酯酶,在碱性环境中可水解磷酸单酯化合物生成无机磷酸、糖类、醇和酚。它定位于生物膜上，是基质小泡和质膜的标记酶，广泛存在于细菌、真菌和动物生物体内。在动物体的各组织中也广泛分布，主要分布于肝脏、骨骼、肾脏、胎盘、小肠、血细胞、乳腺上皮细胞和胆汁中[28]。通常，骨骼中含有 50%的血清碱性磷酸酶[21]。本试验也发现，随着饲粮中磷水平升高，血清碱性磷酸酶的活性呈线性降低趋势，这可能是由于肉仔鸡骨骼从其他代谢反应中吸收获得磷源，如能量代谢、细胞信号转导、细胞膜修复等。碱性磷酸酶和非特异性碱性磷酸酶（TNAP）呈正相关关系，而低磷水平诱导的 TNAP 活性下降直接影响骨骼的矿化程度[29-31]。此外，机体内磷平衡主要受肠道吸收磷含量、肾脏磷重吸收能力、细胞外和骨骼中磷的交换作用共同调控[32]。饲粮低磷水平能够下调机体Ⅱb 型钠磷转运蛋白（*NaPi-*Ⅱ*b*）和Ⅱa 型钠磷转运蛋白（*NaPi-*Ⅱ*a*）2 种钠磷协同转运载体的表达[33-34]，这可能是导致磷平衡失调的根本原因。

4 结 论

综合考虑肉仔鸡 1～21 日龄体增重、胫骨质量和血清生化指标，相对于 DCP（100%），MDCP 对肉仔鸡的生物学利用率是 112.5%。

参考文献:

[1] 阮国安,冯业.饲料中磷的生物学效价评定方法[J].中国禽业导刊,2008,25(8):40–41.

[2] LEESON S,SUMMERS J D.Scott's Nutrition of the Chicken[M].4th ed.Guelph:University Books,2001:361.

[3] EECKHOUT W,PAEPE M D.The digestibility of three calcium phosphates for pigs as measured by difference and by slope-ratio assay[J].Journal of Animal Physiology and Animal Nutrition,1997,77(1/2/3/4/5):53–60.

[4] 贾海康.不同磷酸盐对肉鸡的适宜用量研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2016:28–30.

[5] 云南磷化集团有限公司[J/OL]:http://www.chinaypc.cn/news/1306819598000.html.

[6] CASARTELLI E M,JUNQUEIRA O M,LAURENTIZ A C,et al.Effect of phytase in laying hen diets with different phosphorus sources[J].Revista Brasileira de Ciência Avícola,2005,7(2):93–98.

[7] 中华人民共和国农业部.NY/T33-2004 鸡饲养标准[S].北京:中国农业出版社,2004.

[8] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].2版.北京:中国农业大学出版社,2003:96–105.

[9] SHORT F J,GORTON P,WISEMAN J,et al.Determination of titanium dioxide added as an inert marker in chicken digestibility studies[J].Animal Feed Science and Technology,1996,59(4):215–221.

[10] 屠焰,刁其玉,冯珊珊,等.哺乳期犊牛开食料中原料对其系酸力和pH的影响[J].动物营养学报,2010,22(1):63–69.

[11] LITTELL R C,HENRY P,LEWIS A J,et al.Estimation of relative bioavailability of nutrients using SAS procedures[J].Journal of Animal Science,1997,75(10):2672–2683.

[12] GILBERT N.Environment:the disappearing nutrient[J].Nature,2009,461(7265):716–718.

[13] KEBREAB E,HANSEN A V,STRATHE A B.Animal production for efficient phosphate utilization:from optimized feed to high efficiency livestock[J].Current Opinion in Biotechnology,2012,23(6):872–877.

[14] FARHADI D,KARIMI A,SADEGHI G,et al.Effects of a high dose of microbial phytase

and myo-inositol supplementation on growth performance,tibia mineralization,nutrient digestibility,litter moisture content,and foot problems in broiler chickens fed phosphorus-deficient diets[J].Poultry Science,2017,96(10):3664–3675.

[15] AKTER M,GRAHAM H,IJI P A.Response of broiler chickens to different levels of calcium,non-phytate phosphorus and phytase[J].British Poultry Science,2016,57(6):799–809.

[16] FORSBERG C,PHILLIPS J,GOLOVAN S,et al.The enviropig physiology,performance,and contribution to nutrient management advances in a regulated environment:the leading edge of change in the pork industry[J].Journal of Animal Science,2003,81(2):e68–e77.

[17] 伍爱民,白世平,张克英,等.磷酸—二钙对肉仔鸡的相对生物学利用率评定[C]//第六次全国饲料营养学术研讨会论文集.杨凌:中国畜牧兽医学会动物营养学分会,2010:94.

[18] 万荣,谢木林.新型磷源III型磷酸氢钙在肉鸡上相对生物学利用率的应用研究[J].饲料广角,2014(16):16–19.

[19] 夏良宙,李霞,万荣.不同种类和来源磷酸钙盐对肉鸡生产性能和养分代谢的影响[J].饲料工业,2014(S1):48–52.

[20] 陈晓春,姜光丽,周光荣.磷酸一二钙在产蛋鸡配合饲料中的应用研究[J].中国家禽,2007,29(22):12–15.

[21] LIU S B,LIAO X D,LU L,et al.Dietary non-phytate phosphorus requirement of broilers fed a conventional corn-soybean meal diet from 1 to 21 d of age[J].Poultry Science,2017,96(1):151–159.

[22] 李成珍,唐式校,王义.钙和磷与鸡的营养[J].现代畜牧科技,2016(9):56–57.

[23] 陶庆树.日粮中不同粒度钙源对产蛋后期笼养蛋鸡骨代谢及生产性能的影响[D].硕士学位论文.南京:南京农业大学,2006:8–9.

[24] 王晋晋,王金荣,付佐龙,等.日粮中钙、磷水平对1~3周龄肉鸡骨骼生长的影响[J].动物营

养学报,2010,22(4):1088–1095.

[25] WILKINSON S J,BRADBURY E J,THOMSON P C,et al.Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks.The effect of different dietary calcium and phosphorus concentrations and ratios on nutrient digestibility[J].Animal,2014,8(7):1080–1088.

[26] BRADBURY E J,WILKINSON S J,CRONIN G M,et al.Nutritional geometry of calcium and phosphorus nutrition in broiler chicks.Growth performance,skeletal health and intake arrays[J].Animal,2014,8(7):1071–1079.

[27] CARDOSO E F,DONZELE J L,DE OLIVEIRA DONZELE R F M,et al.Non-phytate phosphorus requirement for broilers from 8 to 21 days of age under heat stress conditions[J].Tropical Animal Health and Production,2018,50(2):317–325.

[28] 吕佳炜,殷红,李春风,等.碱性磷酸酶在骨矿化中的研究[J].黑龙江畜牧兽医,2013(1):32–34.

[29] MORNET E,STURA E,LIA-BALDINI A S,et al.Structural evidence for a functional role of human tissue nonspecific alkaline phosphatase in bone mineralization[J].Journal of Biological Chemistry,2010,276(33):31171–31178.

[30] ORIMO H.The mechanism of mineralization and the role of alkaline phosphatase in health and disease[J].Journal of Nippon Medical School,2010,77(1):4–12.

[31] ADDISON W N,AZARI F,SØRENSEN E S,et al.Pyrophosphate inhibits mineralization of osteoblast cultures by binding to mineral,up-regulating osteopontin,and inhibiting alkaline phosphatase activity[J].Journal of Biological Chemistry,2007,282(21):15872–15883.

[32] MARKS J,DEBNAM E S,UNWIN R J.Phosphate homeostasis and the renal-gastrointestinal axis[J].American Journal of Physiology-Renal Physiology,2010,299(2):F285–F296.

[33] RASANOVIC T C,WAGNER C A,MURER H,et al.Regulation of intestinal phosphate transport. Ⅰ.Segmental expression and adaptation to low-P(i) diet of the type Ⅱb Na(+)-P(i) cotransporter in mouse small intestine[J].American Journal of Physiology-Gastrointestinal and Liver Physiology,2005,288(3):G496–G500.

[34] HUBER K,HEMPEL R,RODEHUTSCORD M.Adaptation of epithelial sodium-dependent phosphate transport in jejunum and kidney of hens to variations in dietary phosphorus intake[J].Poultry Science,2006,85(11):1980–1986.

A Study of Relative Bioavailability of Mono-Dicalcium Phosphate on Broilers

WAN Minyan ZHANG Baohai WANG Hongbo TANG Defu*

（*College of Animal Science and Technology, Gansu Agricultural University, Lanzhou* 730070, *China*）

Abstract: This experiment was to study the effects of dicalcium phosphate (DCP) and mono-dicalcium phosphate (MDCP) on growth performance, tibia indices and serum biochemical indices of broilers, and to assess the relative bioavailability of MDCP with DCP as the control. The experiment used a 2×6 two factor randomized block design, diets contained 2 phosphate sources (DCP, MDCP) and 6 phosphate supplemental levels (0, 0.05%, 0.10%, 0.15%, 0.20% and 0.25%). A total of 990 one-day old Cobb male broilers were randomly divided into 11 groups (control group shared) with 6 replicates per group and 15 broilers per replicate. The experiment lasted for 21 days. The results showed that there were not significant interactions between phosphate sources and phosphate levels for growth performance, nutrient apparent metabolic rate, tibia indices and serum biochemical indices of broilers (P>0.05). The feed intake, body weight gain, tibia ash content and serum phosphorus content of broilers in MDCP supplemental group were significantly higher than those in DCP supplemental group (P<0.05), but the serum alkaline phosphatase activity was significantly lower than that in DCP supplemental group (P<0.05). With

*Corresponding author, associate professor, E-mail: tangdf@gsau.edu.cn (责任编辑 武海龙)

the phosphate supplemental levels increased, the feed intake, body weight gain of broilers were significant improved ($P<0.05$), the ratio of feed to gain and mortality were significant decreased ($P<0.05$). The calcium apparent metabolic rate in 0.25% supplemental group was significantly higher than that in control group and 0.05% supplemental group ($P<0.05$), and the phosphorus metabolic rate, tibia calcium content, tibial phosphorus content and tibial strength in 0.25% supplemental group were significantly higher than those in control group ($P<0.05$). With the phosphate supplemental levels increased, the serum phosphorus content was significantly increased ($P<0.05$), but the Serum alkaline phosphatase activity was significantly decreased ($P<0.05$). According to body weight gain, tibia indices and serum biochemical indices of broilers, the bioavailability for broilers of MDCP relative to DCP （100%） is 112.5%.

Key words: broilers; MDCP; DCP; bioavailability